



TITLE:

平成30 年台風21号による強風・高潮災害の総合研究 --科学研究費補助金・特別研究促進費による突発災害調査研究 平成30年度報告--

AUTHOR(S):

丸山, 敬

CITATION:

丸山, 敬. 平成30 年台風21号による強風・高潮災害の総合研究 --科学研究費補助金・特別研究促進費による突発災害調査研究 平成30年度報告--. 自然災害科学総合シンポジウム講演論文集 2019, 56: 27-40

ISSUE DATE:

2019-09-11

URL:

<http://hdl.handle.net/2433/244302>

RIGHT:

平成30年台風21号による強風・高潮災害の総合研究

--科学研究費補助金・特別研究促進費による突発災害調査研究 平成30年度報告--

丸山 敬

京都大学防災研究所

要 旨

科学研究費補助金・特別研究促進費による突発災害調査研究により、台風1821号による強風・高潮災害について、現地調査、アンケート調査、数値解析等により総合的な調査・研究を行った。その結果、強風や豪雨、突風や落雷等に関する観測・解析データ、人や建物、構造物の被害実態、自治体、公共団体などの被害統計や風の観測記録、高潮による水位変化と高波の越波による被害の実態、災害対応、復旧・復興体制の実態、被害のもたらした影響等を明らかにした。これにより、被害発生に関連する気象学的要因、人や建物、構造物への被害発生プロセス、高潮発生要因と被害メカニズム、災害対応状況等を明らかにし、被害低減策、災害対応、復旧・復興体制の検証を行い、今後の課題についても検討した。本報は突発災害調査研究報告書をまとめたものである。

1. はじめに

平成30年9月4日に「非常に強い」勢力を保ったまま徳島県南部に上陸し、その後兵庫県神戸市付近に再上陸した台風21号は、四国や近畿地方に記録的な暴風をもたらした。この台風はまた記録的な高潮ももたらした。この台風はまた記録的な高潮ももたらした。接近・上陸に伴って近畿や四国の沿岸部では急激に潮位が上昇し、大阪では1961年の第2室戸台風の時に観測した過去の最高潮位を瞬間的に上回る値を観測した。さらに、四国や近畿、北陸周辺に台風本体の活発な雨雲がかかった。これらにより、樹木の転倒、建物屋根の飛散、床上・下浸水などの住宅被害、トラックの横転、建設現場の足場やクレーン、さらには、港のガントリークレーンの倒壊など、多大な被害をもたらした。大規模な停電も発生した。大阪湾沿岸では、強風に伴う高潮被害、関西国際空港では浸水および漂流したタンカーの衝突による連絡橋の破損など、公共インフラ、土木構造物などにも多大な被害をもたらした。本報ではこれらの概要をまとめる。

2. 台風21号の気象学的特徴

2.1 台風経路

平成30年台風21号（T1821、アジア名 Jebi）は、

8月28日南鳥島近海で発生し31日9時には915hPaに達し、“猛烈な（最大風速54m/s以上）”勢力に発達した。21号は伊勢湾台風と比較的似た経路で北上し、その後、やや西寄りに向かい、第2室戸台風に近い経路をとり、9月4日12時に950hPaで徳島県南部に上陸した後、紀伊水道をぬけ、淡路島を通過して4日14時には神戸市に上陸した。9月5日3時に北海道渡島半島西部に達し、5日9時に温帯低気圧に変わった（図1,2）。本州上陸時に950hPaで、非常に強い勢力のまま上陸したのは、1993年の台風13号以来25年ぶりであった。台風21号は、上陸時の移動速度も早かったため、四国、近畿から北海道に至る広範囲で強風が観測され、近畿を中心として広い範囲に大きな被害をもたらした。

このように、非常に強い台風が大阪など大都市を襲ったのは稀であり、近年最大瞬間風速が50m/sを超える強風に大都市が曝されたのも初めての経験といえる。期間最大風速および最大瞬間風速が観測記録を超えたのは概ね危険半円側の地点であり、北陸、東北、北海道日本海側でも記録更新が見られた。また、台風通過後の吹き返しによる強風も強く、高知県室戸岬では西向きに48.2m/s、新潟県両津および石川県金沢では南西に28.8m/sの最大風速を観測した。

2.2 最大瞬間風速の分布

図3に9月4日～5日の間に最大瞬間風速 20m/s 以上を観測した地点を示す。図中の実線で示す台風中心経路を挟んで東側に高い最大瞬間風速を示した地点が分布している。経路近くでは 30m/s 以上を示した地点が集中しており、高い値では 50m/s を超えている。同期間に観測された最大瞬間風速の上位 6 位が 50m/s を超えており、それらの風向のほとんどは南南西から南で概ね台風最接近時に観測されている。特に近畿圏では、関空島（大阪府泉南郡）で南南西の風・最大瞬間風速 58.1m/s（最大風速 46.5m/s）、和歌山（和歌山市）で南南西の風・最大瞬間風速 57.4m/s（最大風速 39.7m/s）、室戸岬（高知県室戸市）で西の風・最大瞬間風速 55.3m/s（最大風速 48.2m/s）を記録するなど、これまでの記録を更新する強風が観測された。さらに、関東地方のように中心経路からかなり離れている地域でも 40m/s 近い最大瞬間風速を記録し、広域にわたって強風をもたらした。

2.3 突風の発生メカニズム

建物等に被害を及ぼす強風の原因となる突風は、台風に伴う循環だけでなく、その中にある積乱雲、さらには地形や都市構造物などさまざまな要因が複合して生じていると考えられる。

台風に伴う突風の発生場所をみると、図 4.5 に示すように、台風中心に対して 150km 以内の北東から南東にかけての領域（危険半円）に集中していた。積乱雲の活動と突風発生の関連を対流活動の指標であるレーダーエコー強度でみると、降雨強度 48mm/h の強エコー下の突風（図中黒塗り）は台風の中心付近で発生しており、中程度のエコー（同グレー）、弱エコー（同白抜き）になるに従い、台風中心から離れた場所で発生していた。顕著な被害をもたらした最大瞬間風速が 50m/s を超えるような突風は、台風

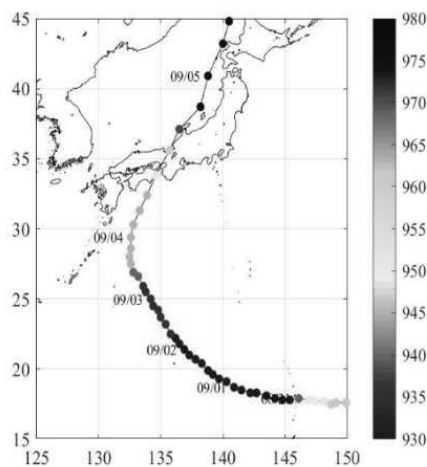


図1 台風21号の経路と中心気圧の推移

の中心から 50km 以内の積乱雲直下で発生していた。また、図6に示す高度 2km のレーダー反射強度とデュアル・ドップラー解析をみると、白線で囲んだ付近の黒矢印群（台風の移動に相対的な風速ベクトル）で示されるように、台風中心の北東側に局所的に反時計回りの回転風系（メソ擾乱）が存在し、地上風（灰色矢印）はここに吹き込むような風系が存在し、このメソ擾乱の北東側で強い降水が存在している。

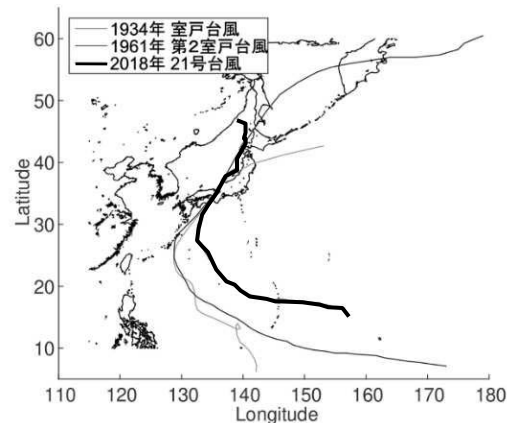


図2 過去台風の経路比較

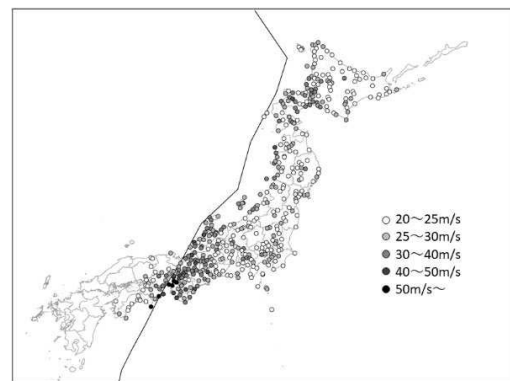


図3 平成30年9月4日～5日に20m/s以上の最大瞬間風速を記録した地点

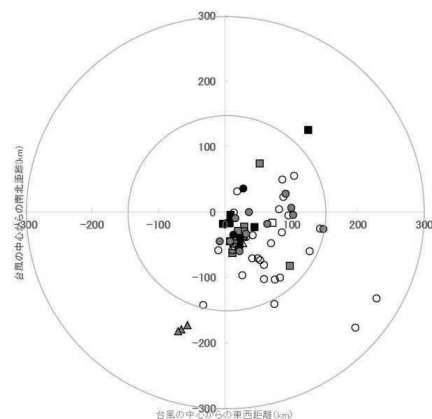


図4 上空のエコー強度別にした突風発生場所。黒塗り：降雨強度 48 mm/h の強エコー，グレー：12～48 mm/h の中程度のエコー，白抜き：12 mm/h 未満の弱エコー

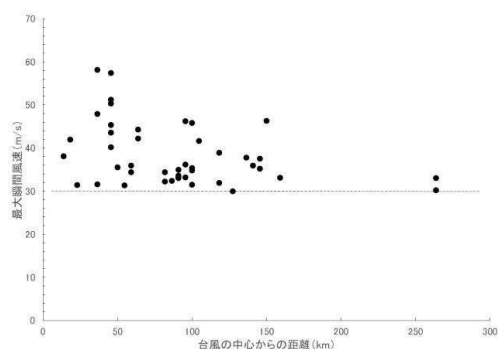


図5 最大瞬間風速（30 m/s 以上）と台風からの距離の関係。

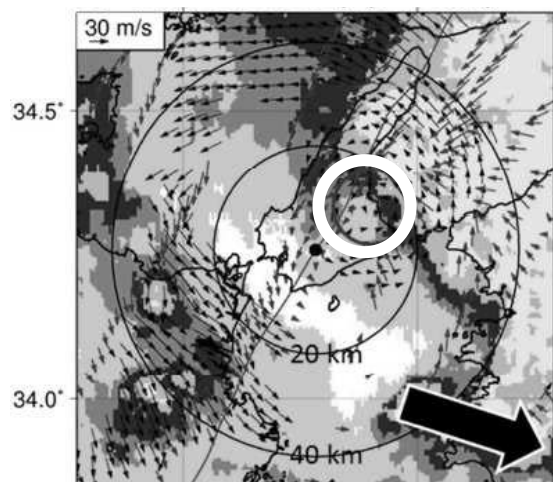


図6 9月4日0400 UTCにおける、高度2kmの台風の移動に相対的な風ベクトル（黒矢印）、台風の移動に相対的な地上最大瞬間風速（灰色矢印）及び高度2kmのレーダー反射強度の分布

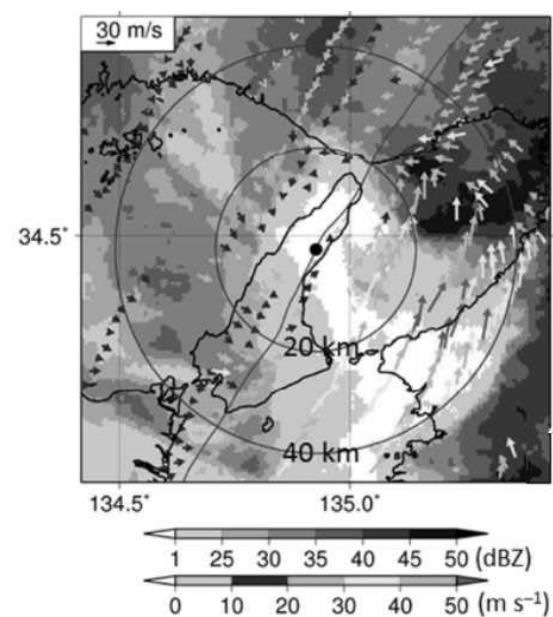


図7 9月4日0430 UTCにおける、地上最大瞬間風（カラー）及び高度2km反射強度（白黒）の分布。

さらに台風が北進すると、大阪湾沿岸、大阪府南部において、50m/sを超す地上最大瞬間風速が台風の進行方向右側の半径20–40km以内に観測されており（図7）、この風速には15m/sという台風移動速度が大きく寄与している。

2.4 市街地内の強風

台風21号では大阪市内（大阪中央区）において最大瞬間風速47.4m/sが観測され、市街地でも強風の被害が多く見られた。市街地内の風はビルの密集度合いや高層ビルの配置の影響を受け、場所によって大きく変化すると考えられ、局所的に極めて強い風が吹いた可能性がある。ここでは、数値計算により大阪市内の強風場を再現した結果を参考に、台風時の市街地内での強風特性を見る。

現在、気象モデルを用いた数値解析が気象予測などに広く用いられており、図8に示すように再現計算は実台風を精度よく再現し、10分間平均風速の観測値は計算結果に良く対応する。さらに、変動風速場を再現することのできるLESモデルを用い、21号台風時の南風を想定した計算を行って変動風速場を再現した結果をみると、図9に示すように、地上10mにおいて市街地内でも場所によっては瞬間的に60m/sから70m/sに迫る強風が吹いていたと推定された。このように、都市のビルや構造物によって上層の強風が街区の低層まで入り込む様子が示され、台風時の地上付近における強風発生メカニズムとして、台風循環および周辺場の風、積乱雲からのダウンドラフト（ダウンバースト）、地形や構造物による増幅という3つの効果が影響しあうことが明らかになった。

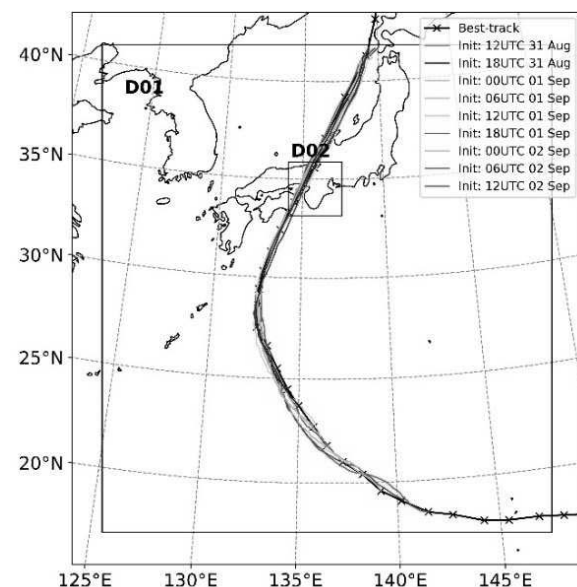


図8 台風経路（ベストトラックおよびWRF計算）

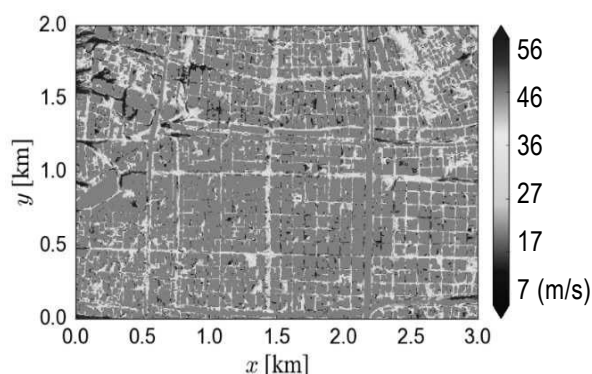


図9 大阪市街地での地上10mでの最大瞬間風速の分布

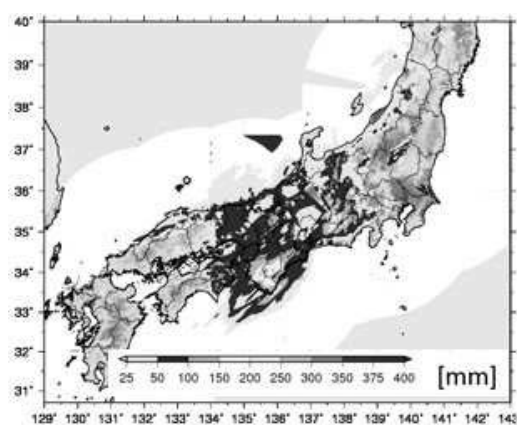


図10 9月4日10～24時の総降雨量

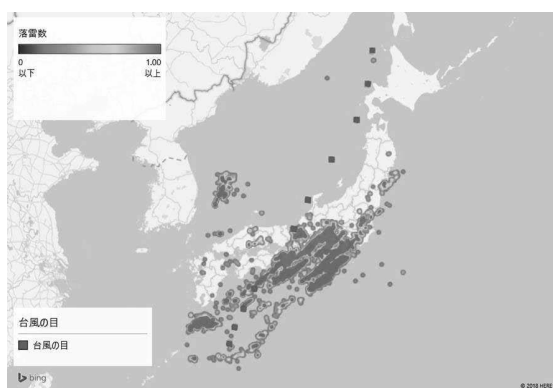


図11 2018年9月4日03時～5日06時の落雷頻

2.5 降雨

台風21号に伴う降雨は、図10に示すように近畿地方を中心に四国、中国、北陸、東海地方に広がり、特に紀伊半島南部で多大な降雨量を観測した。大阪湾沿岸の降雨量については、兵庫県淡路市や洲本市において6時間雨量でそれぞれ139.0mm, 135.5mm, 1時間雨量で85.5mm, 74mmを記録した。また、大阪府能勢町では1時間雨量で69.0mm, 兵庫県神戸市では1時間雨量で60.0mmを記録しており神戸市や淡路島の沿岸では豪雨による被害も多く、短時間降雨による下流域への集水も生じていたと考えられる。

2.6 落雷活動

台風21号に伴う雷活動は、対地雷撃（落雷，CG）数が8000回を超え、比較的に活発だったといえる。図11に示すように、9月4日3時から5日6時までの落雷頻度は、近畿から関東の太平洋沿岸に落雷は集中しており、台風南方のアウトターレインバンドを形成する積乱雲からの落雷頻度が高かった。

2.7 高潮、高波

この台風はまた、高潮、高波をももたらし、特に大阪湾では、大阪と神戸の検潮所でそれぞれ3.29mおよび2.33mの最大水位（大阪管区气象台）を記録し、防潮堤の内外において浸水被害が発生した。陸上に残された痕跡調査による最大水位の分布をみると図12のように、局所的には最大3.5m前後の高潮偏差、最大6mを上回る高潮と波浪による遡上・越波が観測された。具体的には淡路島南、和歌山港付近で4mを超える浸水高（波浪の影響を含む）、大阪湾奥大阪港で3.5～4.0mの浸水高（多少の波浪成分を含む）、西宮～神戸で2.0～3.0m程度の浸水高が記録され、波浪による影響を加えると最大5m以上の浸水高が記録された。

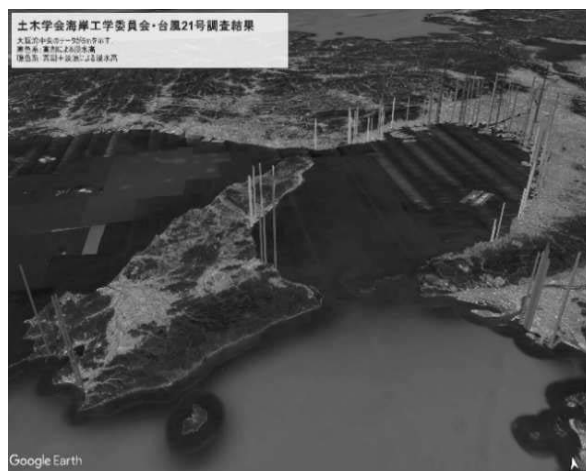


図12 土木学会の調査結果にもとづく浸水高の空間分布(寒色系：高潮偏差，暖色系：高潮偏差+波浪影響（土木学会,2018;森ら,2018）

3. 強風災害

ここでは台風21号によって引き起こされた強風被害について概観する。現地調査、自治体、公共団体などの被害統計などを用いて各種被害の様子を地域別にまとめた。とくに、被害の大きかった大阪府南部および和歌山県北部の被害に関しては現地調査だけではなく小型飛行機からの映像や衛星写真を使った調査結果も紹介する。

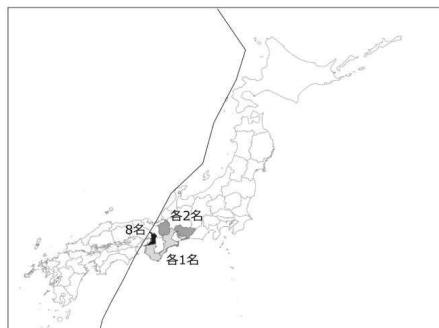
3.1 全国の被害の概要

台風 21 号による人的被害・建物被害は広く全国に分布している。図 13 a に示す通り、死者は経路に近い危険半円側で生じている。死因は、部屋に飛び込んだ飛散物、全壊した倉庫の下敷き、屋根からの転落などが含まれている。一方、負傷者については危険半円側の広域で発生しているが、大阪府が他に比べ突出している（図 13 b）。

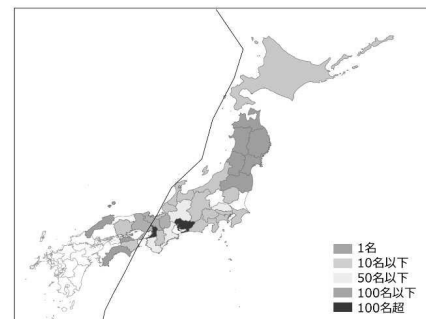
住家被害数は図 13 c~f に示すように、全壊家屋の分布は経路近傍に集中しており、半壊、一部損壊と、被害の程度が下がるにつれて危険半円側に被害範囲が拡大していることが分かる。一部損壊以上の被害家屋数を各都道府県の世帯数で除した被害率を見ると、台風経路の危険半円側近傍において被害率が高く、大阪府の値が突出している。

3.2 近畿地方の被害概要

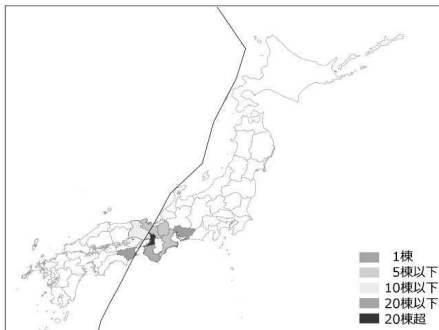
次に被害が集中している近畿地方についてみると、図 14 a,b に示す通り、死者は台風経路に対して危険半円側に分布しており、負傷者まで含めると危険半円側に広がって分布している。住家被害については図 14 c~f に示すように、全壊家屋の分布は大阪府の市町村を中心に台風経路に対して危険半円側に存在しており、半壊、一部損壊以上の被害家屋総数と分布範囲は台風経路に対して危険半円側へと拡大している。被害率は大阪府の各市町村で被害率が突出しており、最大瞬間風速が 58.1m/s を記録した関西国際空港の対岸に位置する泉佐野市が最も高い被害率となっている。



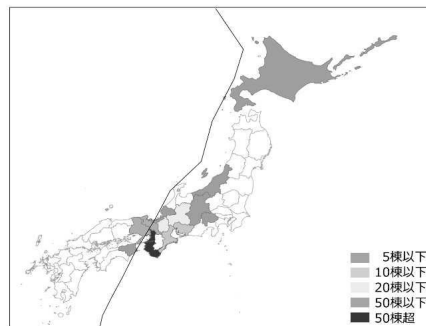
a. 都道府県別の死者数



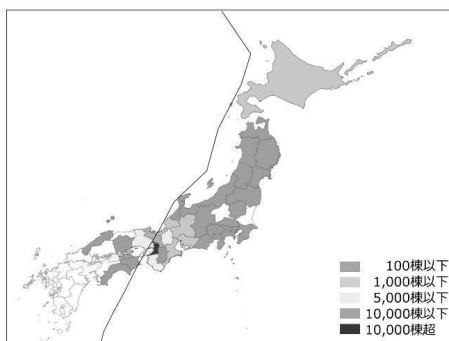
b. 都道府県別の負傷者数



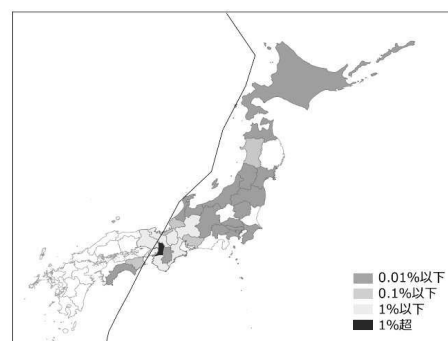
c. 都道府県別の全壊住家数



d. 都道府県別の半壊住家数

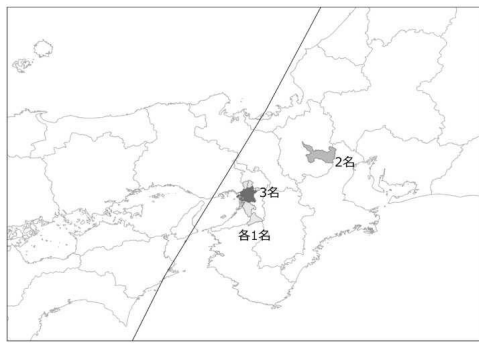


e. 都道府県別の一部損壊以上被害住家数

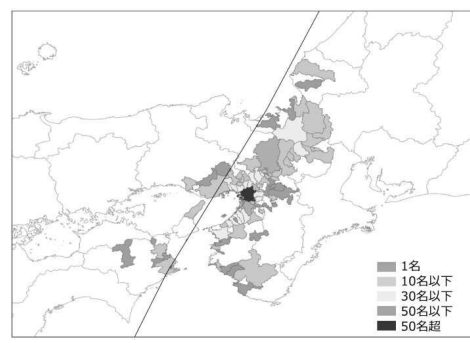


f. 都道府県別の住家被害率

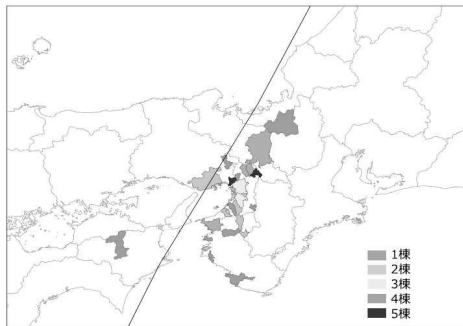
図 13 台風 21 号による全国の被害分布



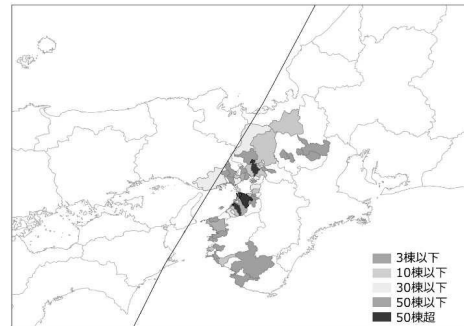
a. 市町村別の死者数



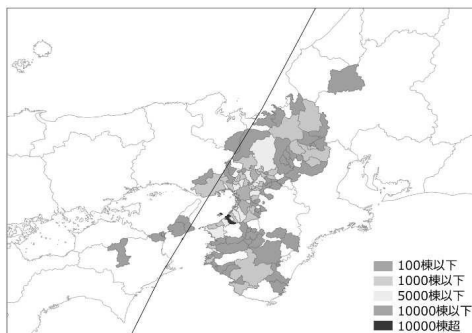
b. 市町村別の死傷者数



c. 市町村別の全壊住家数



d. 市町村別の半壊住家数



e. 市町村別の一部損壊以上被害住家数



f. 市町村別の住家被害率

図 14 台風 21 号による近畿地方の被害分布

3.3 北海道の被害概要

この台風では北海道でも強風が吹き、倶知安町で 42.4m/s、岩見沢市で 37.6m/s の最大瞬間風速を記録し、22 地点において日最大瞬間風速の観測史上 1 位を更新し、各地で被害をもたらした。図 15 に示す北海道内の住家被害の市町村別の分布をみると、太平洋側から道央にかけて被害棟数が多い傾向にあった。

3.4 大阪府南部の被害

大阪府は台風経路に最も近いエリアであり、とくに南部に被害が多かったが、4 万棟を超える住家被害の全貌を行政の統計から迅速に把握することは困難である。そこで、被害分布の概要を調べるために、大阪府南部と和歌山県北部の上空に小型飛行機を飛ばして上空から撮影した映像と衛星写真を用いて調

査したブルーシートの分布状況により、被害分布を推定した結果を以下に示す。

3.4.1 飛行機からの映像による住家被害推定

飛行機からの映像による解析から、図 16 のようにブルーシートは大阪府南部の海岸付近で密度が高かった。行政区域別ごとの一部損壊以上の被害住家数とブルーシート数との関係は図 17 のように得られ、一部損壊以上の被害住家数の極端なデータを除いたものに関しては図中の破線で示す線形関係が得られた。さらにこの関係を使って、和歌山県の一部行政区域で、住家被害の調査結果が出ていない地域の住家被害率を推定したところ、和歌山市において後日明らかになった住家被害数と推定値はほぼ一致した。図 14f に推定値を追加したものを図 18 に示す。

3.4.2 衛星データを使った住家被害推定

衛星写真を使ってブルーシートで覆われた住家を抽出し、被害があった住家を推定した。また、2 節で示した気象モデルによる計算値から、地上 10m における最大風速を図 19 のように推定し、屋根被害率と最大風速の関係を図 20 のように得た。これより、建築基準法および関連法規で規定された風速（粗度区分に応じて換算した基準風速）以下でも相応の被害が広範囲で出ていること。換算基準風速を超えた地域で劇的に被害率が増加しているわけではないこと。換算基準風速前後での被害率が 5.5～7.5%程度であることが明らかになった。

3.4.3 ヒアリング調査

住家被害の多かった泉佐野市の一部地域を対象に、現地での聞き取り調査を行った結果によると、古い

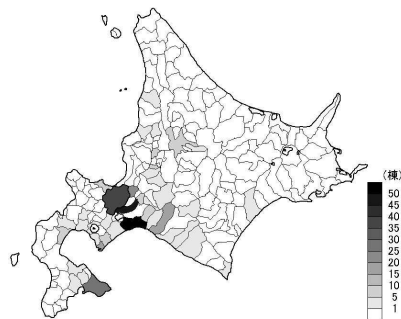


図 15 市町村別の住家被害の状況

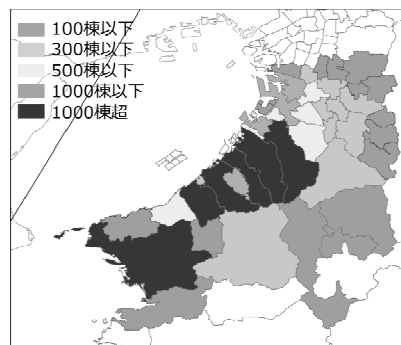


図 16 大阪府南部・和歌山県北部の市町村別ブルーシート数

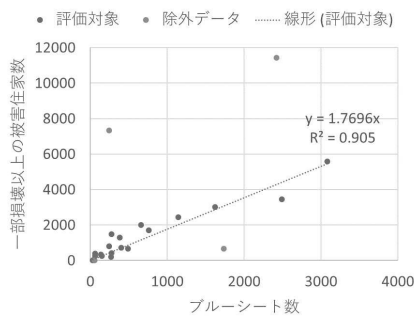


図 17 市町村別ブルーシート数と被害住家数の関係

木造和瓦葺きの住宅を中心に屋根葺材の飛散被害が発生し、その被害に伴う飛来物によって耐風設計された新しい住宅でも外装材被害が発生したこと。新しい住宅や維持管理が行われていた住宅の屋根被害はほとんど確認されず、屋根葺材の耐風設計に関する規則改正やガイドライン整備が功を奏していることがわかった。

3.5 各種建物・構造物の被害

今回の台風では近畿地方を中心として、広範囲の建物・構造物の被害が発生した。観測や解析結果に示されるとおり、大阪府南部で瞬間風速 50m/s、大阪市内で瞬間風速 45m/s こえる強風が吹いており、多種多様な被害が発生した。また、大阪湾沿岸部では高潮・高波による被害も発生した。以下ではこれら各種建物・構造物の被害について概観する。

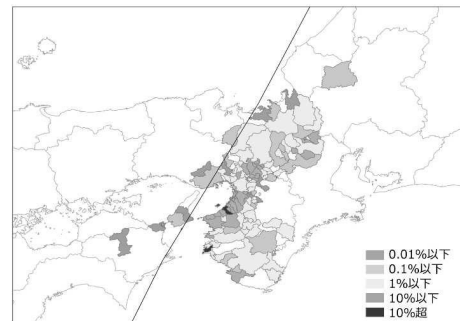


図 18 近畿地方市町村別の被害住家率（推定値を追加）

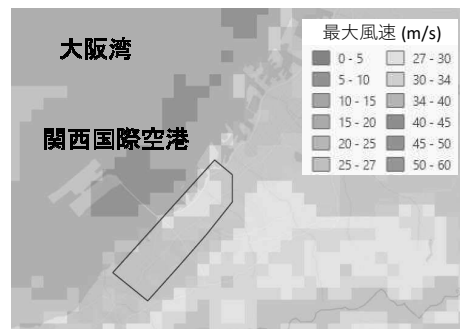


図 19 地上 10m における最大風速の推定値（図中の赤枠内が屋根被害分析対象地域）

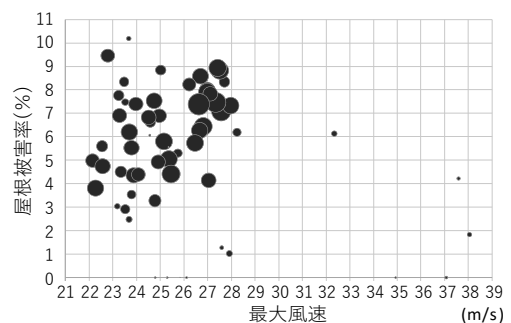


図 20 最大風速と屋根被害率の関係（図中の円の大きさは評価グリッド内の住宅数に比例する）

3.5.1 大規模建築物の被害

市街地では高層ビルや大スパン建物の被害が見られた。これらの多くは外装材の被害（図 21,22）が主であるが，高層階まで飛来物が飛んできたと推定される被害（図 23）も見られた。ビルの外装材が破壊されることにより，風雨の侵入による室内の被害（図 24）。室内側の気圧の急激な変化により，室内や軒の天井の脱落（図 25,26），内装材・間仕切り壁の破損（図 27）などが見られた。



図 21 マンションの屋根葺き材の飛散



図 22 体育館の屋根の飛散

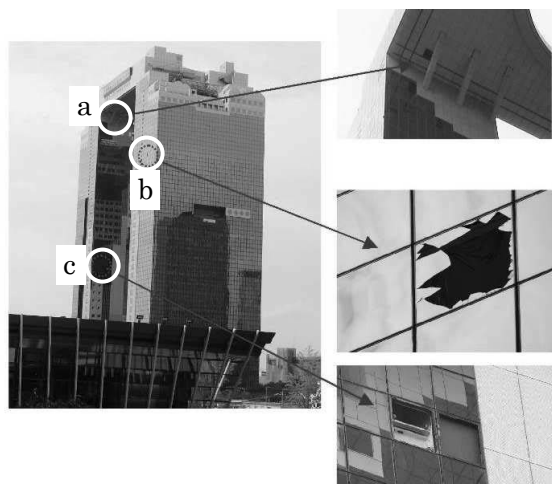


図 23 高層ビルの外装材の被害
(b 部分は飛来物によるものと推定)



図 24 窓ガラスの破損によるビル室内の被害



図 25 ビル室内の天井の脱落



図 26 ビルの軒の天井の脱落



図 27 店舗の間仕切り壁の被害

3.5.2 建築物およびその付属物の被害

住家の被害については、屋根ふき材や壁、窓ガラスなどの外装材の破損(図 28-30)や付属物の被害(図 31-33)。また、破損物の飛散による被害(図 34-36)、伝統的建築物の被害(図 37)、塀(図 38)、門扉、欄干などの被害などの倒壊、転倒の例が見られた。



図 28 瓦の飛散



図 29 屋根ふき材のめくれ・飛散



図 30 屋根の飛散・小屋組みの被害



図 31 集合住宅の手すりの被害



図 32 建築物上設置太陽光発電システムの被害



図 33 自動販売機の転倒



図 34 薄板鋼板屋根の飛散による被害



図 35 看板への飛来物の突き刺さり



図 36 飛来物の衝突による自動車の被害



図 37 神社拝殿の倒壊



図 38 コンクリートブロック塀の倒壊

3.5.3 その他の被害

その他の被害としては足場の被害（図 39）、太陽光発電システムの被害（図 40）、工作物（図 41）、農業施設（図 42）などが見られた。

3.5.4 交通・インフラの被害

交通・インフラの被害としては、高速道路の被害（図 43）。大阪港、神戸港内の人工島では、強風や浸水により、港湾施設が被害を受けた（図 44）。また、強風により流された船舶の衝突により、関西国際空港連絡橋が被害を受けた（図 45）。船舶による橋梁への衝突はこれ以外にも阪神高速道路湾岸線、県道芦屋鳴尾浜線でも発生した。また、車の横転も各地で見られた（図 46,47）。



図 39 防音パネル足場の倒壊



図 40 水上設置型太陽光発電システム設備の被害



図 41 広告板の倒壊



図 42 パイプハウスの倒壊



図 43 遮音壁の損傷



図 44 ガントリークレーンの倒壊

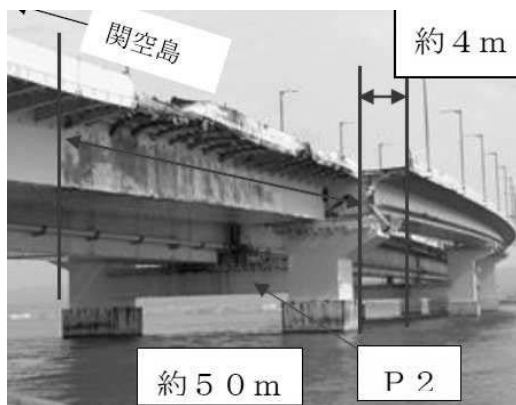


図 45 船の衝突による空港連絡橋の損傷
(国土交通省, 2018)



図 46 橋梁上での車両の横転



図 47 車両被害の発生位置および転倒方向

3.5.5 電力施設の被害

電力施設の被害(図 48)としては、関西電力管内(図 49)において、電柱の倒壊は合計 1343 本。うち、飛来物・建物倒壊に伴う 2 次被害は 788 本(89%)に及んでおり、風力のみによる倒壊はみられなかった。また、配電設備の被害は高圧線 4914 径間、柱上変圧器 362 台、地上機器 38 台、地中ケーブル 544m で、高圧線の断線は大阪と和歌山で多く、柱上変圧器の被害は神戸と和歌山で、地上機器の被害は神戸で多く、地中ケーブルの被害は大阪南でのみ発生した。その他、配電線の回線数では 3765 回線、停電戸数では 220 万軒におよび、回線数については阪神・淡路大震災(649 回線)をはるかに上回る規模のものであった。



図 48 電力施設の被害

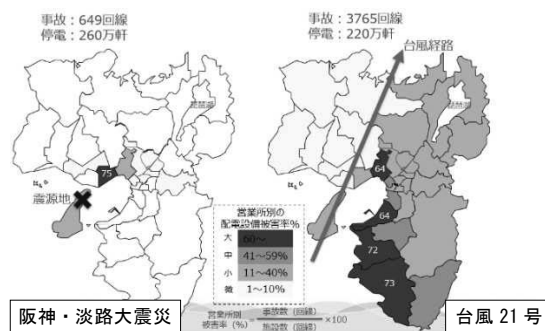


図 49 関西電力管内の被害

4. 高潮・高波(浸水)災害

台風 21 号により、都市部では高潮・高波による被害が発生した。特に、人工島や埋立地での被害が顕著であった。今回の台風による高潮は、第 2 室戸台風に基づいて想定された高潮水位を超えたため、堤外地には大きな浸水被害をもたらしたが、防潮対策の高さ不足による市街地への高潮の越流はほとんど確認されなかった。しかし、護岸や防潮堤に対して高波が作用し、越波による浸水被害が生じた例は多くみられた。以下では、都市部の主な被害について概説する。

4.1 都市部の高潮・高波による浸水被害

4.1.1 埋立地・人工島の浸水被害

南芦屋浜では潮芦屋ビーチにおいて、図 50 のように、約 10 基のコンテナの漂着が確認されており、さらに、階段護岸上の公園や背後の道路に漂流物が散乱していたことから、護岸を越えた越波による浸水が発生していたと考えられる。また、芦屋ベランダと呼ばれる南側護岸においても、護岸上に整備された駐車場が洗掘されていたことから、越波が起きていたことがわかった。さらに、護岸背後の涼風町の道路には、図 51 のように、かなりの量の砂が堆積しており、越波が激しかったことが推察された。また、涼風町の住宅の外壁に明瞭な浸水痕跡が確認され、

床上浸水が発生していたことがわかった。

西宮市の浜甲子園でも同様に、甲子園浜背後の護岸を越波した氾濫水が、県道 340 号線を南から北に向かって浸水した。同様に今津灯台付近でも、護岸を越えた高潮が今津浜の道路を冠水させた。さらに、漂流した台船が阪神高速湾岸線側道の県道 573 号線の橋脚に衝突し、橋桁が動き、復旧に時間を有する被害が生じた。

六甲アイランドでは、高潮による浸水が顕著であった。図 52 に六甲アイランドで撮影された浸水状況を示す。大規模な浸水により自動車やコンテナが流され、道路上に散乱した。また、六甲アイランドと対岸を結ぶ六甲大橋の出入口付近の道路が冠水し、島は約 3 時間にわたり孤立状態になった。阪神淡路大震災の際に、ポートアイランドに架かる神戸大橋がずれて島が孤立し、その後、代替アクセスとして神戸港島トンネルが整備された。しかしながら、沈埋トンネルは風水害の浸水に対して脆弱で、今回も翌 9 月 5 日まで通行止めが続いた。

4.1.2 防潮ライン外側の浸水被害

防潮ラインの外側、いわゆる堤外地の浸水被害の例として、神戸ハーバーランドにおける高浜岸壁が図 53 のように高潮で浸水し、煉瓦倉庫レストラン街が水に浸かった被害が挙げられる。また、ハーバーランドの西側に位置する東川崎町の湊小学校周辺でも、浸水が発生した。防潮ゲートが閉められたために、住宅地への高潮の浸水は防がれたが、その一方で、排水が追いつかずに、内水氾濫による床上浸水が起こった。

サンシャインワープ神戸では、腰から胸の高さまで浸水し、避難する人にとって大変危険であった。一方、サンシャインワープ神戸のショッピング施設の背後の道路と住宅地との間には防潮堤が整備されており、住宅地では浸水被害は発生しなかった。

4.2 小河川の氾濫被害

台風 21 号による高潮は、河川水位の有意な上昇をもたらした。高潮の河川遡上で顕著だったのは淀川であった。淀川にかかる淀川大橋では高潮の影響により堤防高を 21cm 超過したが、その下流の阪神なんば川淀川橋梁、伝法大橋では、防潮鉄扉（陸閘）が閉鎖されて浸水が回避された。

台風通過に伴い、9 月 4 日 13:00-14:00 の間に時間雨量 50mm 以上の雨が、大阪府から兵庫県東部にかけて降った。この短時間強雨が、河川水位の上昇に寄与したと考えられる。特に六甲山系の中小河川は河床勾配が急なため、流出時間が短く、短時間強雨

による影響が大きく、津門川が氾濫危険水位を超過し、宮川（兵庫県芦屋市、図 54）と高橋川（兵庫県神戸市東灘区）で小規模な氾濫が発生した。



図 50 潮芦屋ビーチへのコンテナ漂着



図 51 芦屋市涼風町における越波浸水の痕跡



図 52 六甲アイランドにおける浸水被害
(Twitter より、9/4 14:23 配信)



図 53 煉瓦倉庫レストラン街の浸水
(Twitter より 9/4 14:44 配信)



図 54 宮川の氾濫と溢水
(Twitter より 9/4 14:44 配信)



図 55 六甲アイランドにおけるコンテナの散乱

4.3 港湾・船舶の被害

六甲アイランド東側では高潮と波浪により、甚大な被害が発生した。図 55 はコンテナの漂流状況であり、高潮による流れでコンテナが漂流し、コンテナターミナル外周のフェンスまで流されて集積したものと推定される。自動車の被害は、高潮で流されただけでなく、波によって持ち上げられて積み重なり、被害が拡大した。六甲アイランド東側は地盤が全体に低く被害が大きい。一方、六甲アイランド西側は、東側と比較すると浸水深が小さかったものの、コンテナターミナルでは電源施設が高潮によって浸水し、ガントリークレーン等の設備が稼働できない状態となった。

西宮地区では横引きゲート式の陸閘が変形し、堤内地への海水の侵入が認められたが、前浜地区では海岸堤防が防護機能を発揮し、堤内の住宅地の浸水を防いだことが確認された。

高潮・高波による被害は全体として湾奥にあり、高潮による流れと強風により大型船舶、コンテナ、自動車等が漂流し、関西国際空港の連絡橋への衝突や湾奥での様々な被害を増幅した。

5. 災害対応、復旧・復興体制の検証

災害対応、復旧・復興体制の検証を行うために、インタビュー、および、アンケート調査を実施し、各組織の災害対応状況についての調査結果をまとめた。ライフライン企業の災害対応事例としては、強風の影響により大規模な停電被害を経験した関西電力の事例。高潮・高波による浸水と、船舶の衝突により連絡橋の被害を受けた関西国際空港の被害。鉄道事業者として JR 西日本の災害対応を取り上げ、対応状況について明らかにした。関西国際空港については、害対応とレジリエンスの定量化の可能性について航空機の離発着記録を用いて分析を行い、離陸便は着陸便に比べ、台風の進路や状況を見ながら、ぎりぎりまで離陸の可能性を探っていたことが伺えが、そのことが空港島内の多数の孤立者を生んだ原因となったことを明らかにした。

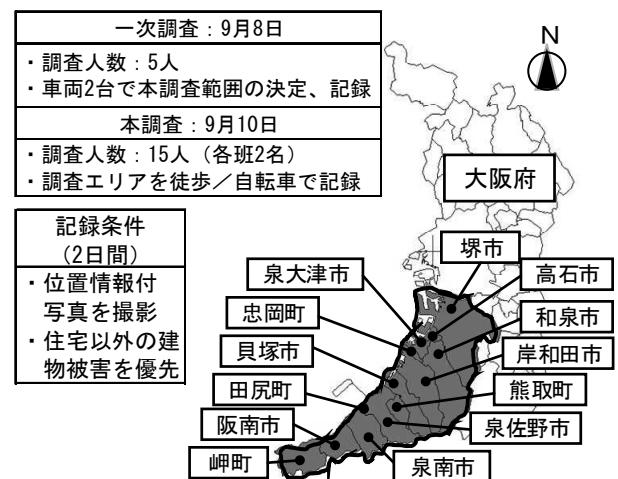


図 56 大阪府南部地域の被害調査概要

今回の台風 21 号の被害を記録し、今後の被害軽減に役立てることを目的とし、調査収集された被害写真を公開型 GIS ヘマッピングした。また、大阪府南部 13 市町職員を対象としたアンケート調査（図 56）を行って、災害対応、復旧・復興体制の検証を行った。その結果、災害に対応しつつ通常業務が停止されなかったことで、人員確保に苦慮した事等が明らかとなった。

産業部門へのアンケート調査では、強風と高潮ハザードがもたらした影響の計量化を目指して、アンケート調査を実施し、物的被害の状況や企業の操業能力に及ぼす影響を分析した。その結果、製造業・非製造業ともに、災害によって生じた生産（操業）能力の低下が大きいほど、回復に要する時間が長くなっていることがわかった。また、製造業に比して

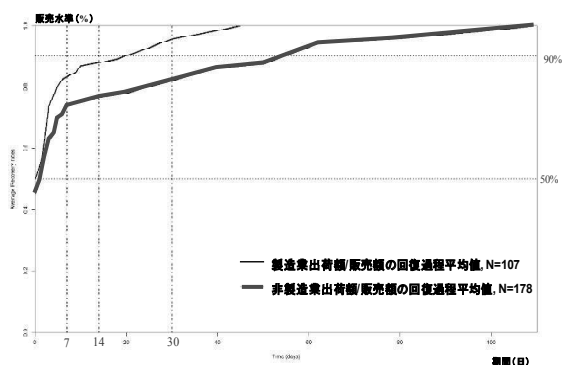


図 57 出荷額・販売額の平均値の回復過程

非製造業の回復により時間がかかっていることが分かった（図 57）。

6. おわりに

平成 30 年台風 21 号の強風・高潮災害に対して行われた調査をもとに、強風および豪雨など、被害発生の気象学的要因、街区における強風被害の空間的分布の解明、現地調査により被害の実態および、自治体、公共団体などの被害統計や強風の観測記録の収集による構造物や人への被害、高潮による水位変化と高波の越波による被害を概観した。

地球温暖化による将来気候のもとで強大な台風の発生頻度の増大が示唆されている今日、今回の台風被害は都市域において繰り返されることが予想される複合災害の典型である。災害後、気象学的立場からの強風・高潮の発生メカニズム、都市部を含む広域で発生した建築物・構造物の被害発生メカニズム、都市沿岸部を含む沿岸部および人工島で発生した高潮被害のメカニズム、などの解明に資する数多くのデータが得られ、今後の防災・減災技術、災害対応、復旧・復興体制の検証などを進める上で極めて重要な情報が得られた。これは、学術的成果のみならず、

わが国の防災・減災のあり方に及ぼすインパクトが極めて大きいと評価できる。これらが将来の災害の低減ならびに安全・安心な社会の達成のための一助になれば幸甚である。

参考文献

土木学会海岸工学委員会 (2018) 2018 年台風 21 号 Jebi による沿岸災害, <http://www.coastal.jp/ja>, 2018 年 9 月 22 日。

森ら (2018) 2018 年台風 21 号 Jebi による沿岸災害調査報告, 土木学会誌 12 月号, 4p.

国土交通省運輸安全委員会, (2018.12) 「船舶事故調査の経過報告について (平成 30 年 12 月 20 日)」

関西電力 (2019) : https://www.kepco.co.jp/souhaiden/pr/2018/pdf/1213_1j_02.pdf, 2019 年 2 月 23 日閲覧

本文中で特に表記のない図, 表, 写真は全て, 平成 30 年度科学研究費助成事業-科研費-特別研究促進費研究「平成 30 年台風 21 号による強風・高潮災害の総合研究」報告書から引用した。

謝 辞

本稿は、平成30年度日本風工学会突発災害調査費および平成30年度科学研究費助成事業-科研費-特別研究促進費研究「平成30年台風21号による強風・高潮災害の総合研究」(丸山 敬：研究代表者, 2019)の助成を受け、災害発生のメカニズムの解明や人的・物的被害の実態解析のための総合研究調査を実施した結果をもとにまとめたものである。調査に際しては、日本風工学会、日本建築学会、土木学会、日本気象学会、日本鋼構造協会などに所属する風工学、建築学、土木工学、気象学、構造工学などの研究者の協力も得て実施された。ここに記して謝意を表す。